



农村电网动态 无功补偿与谐波抑制

马文川 著

NONGCUN DIANWANG DONGTAI WUGONG BUCHANG YU XIEBOYIZHI

黑龙江科学技术出版社

农村电网 动态无功补偿与谐波抑制

马文川 著

黑龙江科学技术出版社

图书在版编目 (C I P) 数据

农村电网动态无功补偿与谐波抑制 / 马文川著.

-- 哈尔滨: 黑龙江科学技术出版社, 2013.8

ISBN 978-7-5388-7652-9

I. ①农… II. ①马… III. ①农村配电-电力系统-无功补偿-高等学校-教材②农村配电-电力系统-谐波-高等学校-教材 IV. ①TM727.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 187764 号

农村电网动态无功补偿与谐波抑制

NONGCUN DIANWANG DONGTAI WUGONG BUCHANG YU XIEBO YIZHI

作 者 马文川

责任编辑 项力福 马远洋

封面设计 赵雪莹

出 版 黑龙江科学技术出版社

地址: 哈尔滨市南岗区建设街 41 号 邮编: 150001

电话: (0451) 53642106 传真: (0451) 53642143

网址: www.lkcbs.cn www.lkpub.cn

发 行 全国新华书店

印 刷 哈尔滨报达人印务有限公司

开 本 880 mm × 1230 mm 1/16

印 张 13

字 数 300 千字

版 次 2013 年 8 月第 1 版 2013 年 8 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5388-7652-9 / TS-528

定 价 98.00 元

【版权所有, 请勿翻印、转载】

前 言

农村电网是国家电网的重要组成部分，是新农村建设的基本保障，目前我国县城及农村用电量已占全社会用电量的 52% 以上，而且随着社会主义新农村建设、村镇化建设以及“家电下乡”等政策的实施，农村用电负荷快速增长，现有的农网供电能力和供电条件已不能满足农村日益增长的用电需求。并且农村电网中无功功率不足的问题尤为突出，对农网负荷实现就地无功补偿，可以提高农村电网的供电可靠性，降低电能损耗，提高电压合格率，因此，做好农村电网的无功补偿工作具有一定的理论意义与应用价值。本文对静止无功补偿器、静止无功发生器及矩阵变换器三种无功补偿设备的拓扑结构，及其在不同工况下的控制方法行了深入细致的研究。

传统的无功补偿与谐波抑制手段—静止无功补偿器（Static Var Compensator, SVC），因具有结构简单，容量大，工作可靠，性价比高等优点，在无功补偿与谐波抑制领域仍占有重要地位。在配电网中，电压的不对称是普遍存在的，电压不对称时，已有的补偿策略会导致 SVC 向系统倒送容性无功功率，抬高系统电压，并使补偿器产生附加的 3 次谐波电流，影响系统正常运行。所以研究在电压不对称条件下，如何保证 SVC 正常工作具有一定的理论意义与应用价值。本文针对电压不对称及三相负荷不平衡情况下，晶闸管控制电抗器（Thyristor Controlled Reactor, TCR）的补偿策略，相关参数的快速检测方法，滤波器组的优化设计方法进行了研究。

作为一种先进的无功补偿装置，配电网静止同步补偿器(Distribution System Static Synchronous Compensator, D-STATCOM)在无功功率补偿、电能质量改善等方面发挥了重要作用，引起了国内外专家、学者的广泛关注。随着社会对电能需求的日益增长及电力用户对电能质量要求的不断提高，对无功补偿设备的容量及补偿性能等方面也提出了更高的要求。但是目前可关断器件的容量及耐压水平限制了 D-STATCOM 在容量及接入电压水平等方面的发展。另外，配电网中系统运行工况比较复杂，采用合理有效的控制方法提高 D-STATCOM 的补偿性能也就成为国内外学者研究的重要问题。本文针对上述问题，对 D-STATCOM 主电路的拓扑结构及不平衡系统中 D-STATCOM 的控制方法进行了一系列研究。

矩阵变换器(Matrix Converter, 简称 MC)是一种直接变换型的交流 - 交流电力变换装置，具有很多优于传统交流电力变换装置的特性，如：无需大容量的储能元件、电能的双向流通、正弦输入和输出、可控的输入功率因数等。MC 因其诸多的优良性能，越来越受到广大研究人员的青睐，已成为近年来研究的一个热点。MC 的调制策略是其控制方法的核心部分，也是国内外学者一直以来的研究重点。因此，本文针对 3×3 MC 带三相平衡负载和 3×4 MC 带三相不平衡负载的调制策略进行了研究。

硬件装备是执行相应补偿控制策略的载体，其设计是否合理对装置运行水平十分重要，本书介绍了一种可以在 10kV 系统运行的 SVC 装置的设计方法。SVC 晶闸管阀组及其控制系统设计的优劣，会直接影响 SVC 能否正常、可靠运行，是装置研制的关键环节。本书阐述了晶闸管阀组的设计方法，包括晶闸管阀组参数的选择，相应辅助电路的设计。完成了以 TMS320F2812 为核心的控制系统软、硬件电路的设计，对软件模块进行划分，给出了主控流程图，并介绍了基于有理插值的晶闸管触发角计算方法。制作了样机，给出了相应的实验结果，证明了所设计的高压静止无功补偿器可以在 10kV 系统可靠运行，及所提出的适用于电压不对称条件下补偿算法及滤波器优化设计方法的正确性。

本书对电压不对称条件下农村电网无功功率补偿相关问题进行了研究，为改善补偿效果提供了一定的理论依据，所设计的产品也得到了一定范围的应用，其中，“高压 TSC 动态无功功率补偿装置”项目获得 2009 年黑龙江省科技进步二等奖。

本书以作者博士论文、博士后课题及相关工作为基础进行编写，在此，感谢我的博士生导师哈尔滨工业大学纪延超教授和王建赧副教授多年来对我的悉心指导。感谢博士后合作导师东北农业大学苏中滨教授、电气工程系赵玉林教授对我工作给予的关心和指导。感谢课题组牟宪民博士、伏祥运博士、谭光慧博士、王树文博士、王汝田博士及魏晓霞博士对本书出版给予的鼎力支持。

本书的出版，得到了黑龙江省博士后启动基金（LBH-Z11228）、东北农业大学校博士启动基金及东北农业大学电气与信息学院公关计划的资助，特此感谢。

马文川

于东北农业大学

2013 年 6 月 4 日

目 录

1 农村电网无功功率补偿概述	1
1.1 农村电网无功功率补偿目的和意义	1
1.2 农村电网无功功率补偿装置发展概况	2
1.3 TCR+FC 型静止无功补偿器研究现状	6
1.4 D-STATCOM 型静止无功补偿器研究现状	11
1.5 矩阵变换器研究现状	19
1.6 本研究主要工作内容简介	28
2 电压不对称时 TCR 补偿三相不平衡负荷的补偿策略	29
2.1 TCR 型静止无功补偿器的基本结构与工作原理	29
2.2 电压不对称时 TCR 补偿三相不平衡负荷的补偿策略	31
2.3 补偿策略仿真分析	40
2.4 本章小结	47
3 电压不对称时补偿三相不平衡负荷所需参数的检测方法	49
3.1 电压不对称度及正负序分量相角差的检测方法	49
3.2 基于瞬时无功功率理论电流分量的改进检测方法	54
3.3 检测方法仿真分析	57
3.4 本章小结	60
4 电压不对称时无源滤波器组的优化设计	61
4.1 无源滤波器原理及性能分析	61
4.2 电压不对称时无源滤波器组的优化设计	63
4.3 滤波器优化方法仿真分析	70
4.4 本章小结	75
5 不平衡负载补偿时 D-STATCOM 控制方法	77
5.1 D-STATCOM 的分相 Δ 控制	77
5.2 基于电网电流检测的解耦控制	85
5.3 本章小结	95
6 基于 FBD 功率理论的 D-STATCOM 控制方法	97
6.1 FBD 功率理论	97
6.2 基于 FBD 功率理论的控制方法	101

6.3 本章小结	114
7 D-STATCOM 的数字控制方法	117
7.1 传统无差拍控制方法	117
7.2 改进的无差拍控制数学模型	121
7.3 电流和电压的预测方法	122
7.4 参数估计方法	123
7.5 参考电流计算电流及直流电压控制	124
7.6 数字控制系统结构	127
7.7 D-STATCOM 数字控制方法仿真研究	128
7.8 数字控制方法的实验验证	130
7.9 本章小结	131
8 一种新的 3×3 MC 调制策略	133
8.1 引言	133
8.2 3×3 MC 的拓扑结构及工作原理	133
8.3 3×3 MC 新调制策略的原理与分析	136
8.4 输入电压非对称情况下调制策略的改进	149
8.5 本章小结	158
9 不平衡负载情况下 3×4 MC 的调制策略	159
9.1 3×4 MC 的拓扑结构及工作原理	160
9.2 3×3 MC 到 3×4 MC 调制策略的“增补”思想	162
9.3 3×4 MC 逆变级输出电压的分析	164
9.4 N 相桥臂的调制方法	166
9.5 输入电流的谐波分析	168
9.6 仿真分析	170
9.7 本章小结	174
10 高压静止无功补偿器实验研究	175
10.1 高压 SVC 研究概况	175
10.2 高压 SVC 实验研究	176
10.3 电压不对称时补偿策略验证	187
10.4 电压不对称时滤波器设计方法验证	189
10.5 本章小结	190
参考文献	191

1 农村电网无功功率补偿概述

1.1 农村电网无功功率补偿目的和意义

电力是国家的主要能源和工业经济的命脉，在人民生活和工业发展中起到举足轻重的作用，加强电力系统控制，保证其安全、稳定、经济的运行，保障电力用户的电能质量都是重要的^[1,2]。

无功功率控制是电力系统控制的重要内容之一。在电力系统中，变压器、线路等电力网络元件，以及异步电动机、电弧炉、轧钢机等用电设备要消耗大量的无功功率。这些无功功率如果不能得到及时合理的补偿，将造成大量的无功功率在电网中传输，会给电力系统运行带来许多不利影响，如使发电机、变压器等电力设备容量增加和损耗增大，降低现有电力设备的利用率，影响电力系统运行的经济性。冲击性无功负荷还会导致供电点电压波动，影响供电质量。由此可见，无功功率平衡对提高电网的经济效益和改善供电质量至关重要。

随着电力电子技术的发展，电力电子装置被广泛应用于电力系统中，电力电子装置由于自身工作原理所致，将大量谐波注入电网，使谐波污染现象越来越严重。近些年来由谐波引起的各种故障和事故不断发生，主要危害包括以下几个方面：引起电力系统局部出现并联或串联谐振，谐波含量放大，烧毁电容器或电抗器、影响电度计量和测量仪表的计量结果，使计量结果出现误差、使电能的生产、传输和利用的效率降低、导致继电保护与自动装置误动作等。可见，及时有效地对谐波进行治理，对提高电能质量具有重要意义。

由上可见，利用与电力电子技术相关的新理论、新器件、新技术，对谐波进行有效抑制，对无功功率进行合理补偿，是电力系统需要解决的重要技术课题^[3]。在输配电系统中，无功功率补偿器主要可以发挥如下作用：

- (1) 动态补偿无功功率，提高功率因数，降低网损，增加线路的输电能力。
- (2) 抑制非线性负荷引起的谐波干扰，改善电能质量。
- (3) 使三相负荷平衡化。
- (4) 调节系统电压和电压稳定裕度。
- (5) 加强对低频振荡的阻尼以及抑制次同步振荡。

由于无功功率补偿器具有以上功能，是提高系统运行性能和改善电能质量的有效手

段，所以在世界各国输配电系统中得以普遍采用^[4]。

我国农村电网供电质量相对较差，且无功功率补偿器容量通常较大，供电质量较小的变化均会对其产生一定的影响，影响其正常工作。所以研究在供电质量较差条件下，如何保证无功功率补偿器正常工作，具有重要的理论意义与应用价值。本文正是在这样的背景下，针对不同供电质量条件，对静止无功补偿器、配电网静止无功发生器及矩阵变换器的工作方式，控制方法深入细致的研究，并设计了一种适用于 10kV 系统的无功补偿装置。

1.2 农村电网无功功率补偿装置发展概况

无功功率补偿装置经历了三个发展阶段。第一个阶段是以同步调相机和并联电容器为代表的传统无功功率补偿器；第二个阶段是以晶闸管控制电抗器和晶闸管投切电容器(Thyristor Switched Capacitor, TSC)为典型代表，以晶闸管作为控制开关的静止无功补偿器；第三阶段是以静止同步补偿器(Static Synchronous Compensator, STATCOM)为代表的基于逆变器结构的新型补偿器。下面对各阶段具有代表性的补偿器的原理和特点进行简要介绍。

同步调相机是传统动态无功功率补偿装置，是专门用来产生无功功率的同步电机，在过励磁和欠励磁的不同情况下，发出容性或感性无功功率。系统电流与无功功率流向示意图及相应相量关系如图 1-1 所示：当励磁电流大于空载励磁电流时，同步机处于过励运行状态，如图 1-1 a)所示：此时，同步调相机为无功电源，向电力系统送出无功功率，当励磁电流小于空载励磁电流时，同步机处于欠励运行状态，如图 1-1 b)所示：同步机从系统吸收无功功率，等效为无功负荷。二三十年代以来的几十年中，同步调相机在电力系统无功功率控制中一度发挥主要作用，但由于它是旋转电机，因此损耗和噪声都很大，运行维护复杂且响应速度慢，已无法适应快速无功功率控制的要求，因此已逐渐被其他的无功功率补偿设备所取代。

随着并联电容器工艺的迅速发展，以其良好的经济性，几乎取代了输电系统中的同步调相机。电容器可以采用固定连接或通过机械开关进行投切。并联电容器维护方便，装置容量设置灵活，既可集中使用，又可分散装设，配置十分方便。但并联电容器也存在只能补偿固定的无功功率，且在系统含有谐波电流时，还可能发生并联谐振，使谐波电流放大的问题。由于晶闸管阀组价格昂贵，所以在一些无功负荷变化比较缓慢的情况下，常使用断路器或真空接触器作为投切开关。目前，真空接触器因具有控制简便、耐频繁操作、灭弧室无需检修、成本低廉等优点，成为机械投切电容器投切开关的首选，

但相对无触点电子开关仍存在投切间隔时间较长，投切位置不够准确，投切过程易产生冲击电流，影响开关及电容使用寿命的缺点，但由于其价格相对低廉所以至今仍有一定应用。

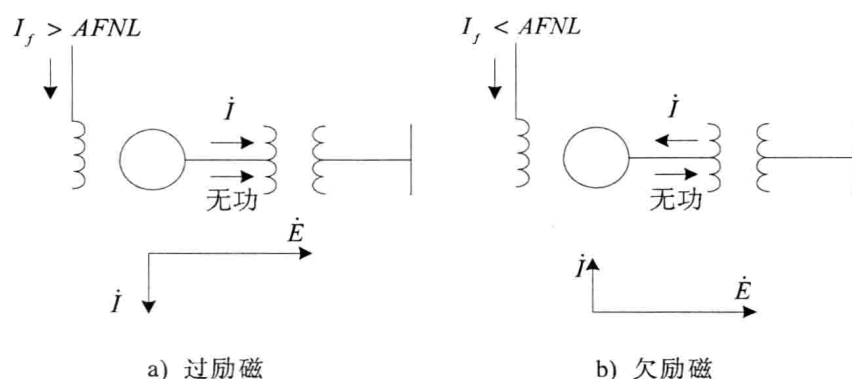


图 1-1 两种无功功率流向相量图（AFNL 是空载励磁电流）

自饱和电抗器(Self-saturated Reactor, SR)是世界上最早的静止无功补偿器,其原理图如图 1-2 所示:

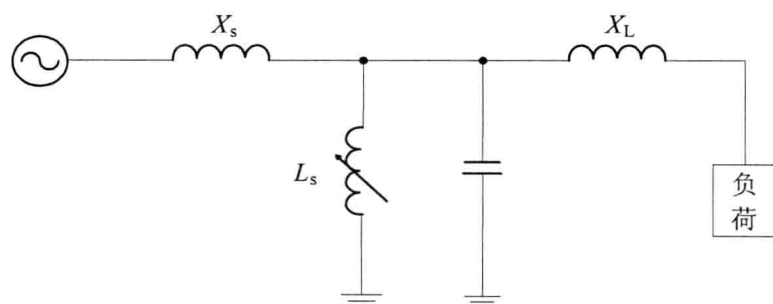


图 1-2 自饱和电抗器原理图

饱和电抗器利用铁心的饱和特性，使感性无功功率随端电压的升降而增减，当母线电压升高时，感性电流增加，电流在系统电抗 X_s 上产生压降，达到维持系统电压不变的目标。1967 年，英国 GEC 公司制成了世界第一批饱和电抗器型静止无功补偿装置，在输电系统中投入商业运行，它响应速度快，没有旋转部件，但由于其铁心需磁化到饱和状态，损耗和噪声都很大，并且存在非线性电路的一些问题，所以未能成为静止无功补偿装置的主流设备。

随着电力电子技术的发展，出现了大功率晶闸管，由此产生了以 TCR 及 TSC 为代表的静止无功补偿器。TCR 采用线性电抗器与反并联晶闸管串联的电路结构，TCR 原理图如图 1-3 所示：

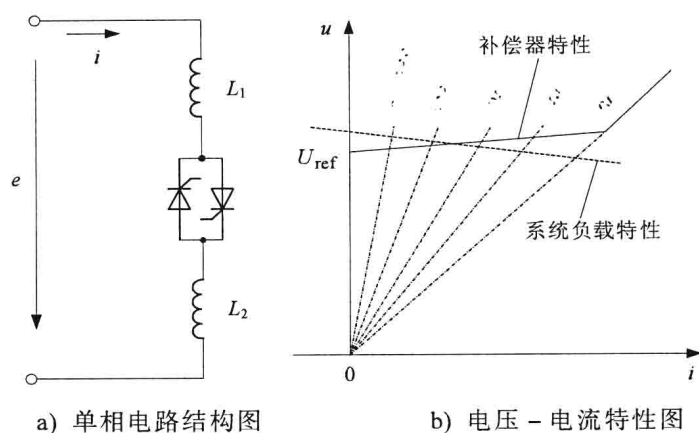


图 1-3 TCR 原理图

TCR 单相电路结构图如图 1-3a)所示: TCR 通过改变晶闸管的触发角控制电抗器的等效电抗值。TCR 电压-电流特性曲线如图 1-3b)所示: U_{ref} 是无补偿时的正常工作电压。可以看出, TCR 的电压-电流特性实质上是一种稳态特性, 特性上的每一点都是 TCR 控制系统不断调节触发延迟角的结果。图 1-4 所示为晶闸管投切电容器的基本电路结构。它利用反并联晶闸管构成双向无触点开关, 将电容器组投切到交流系统母线上。

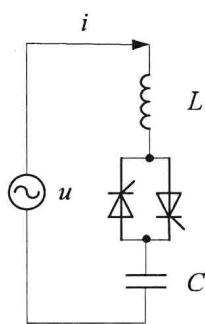


图 1-4 TSC 电路示意图

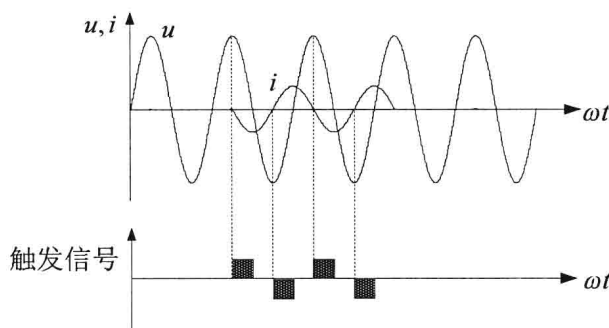


图 1-5 电网电压及 TSC 电流波形

电网电压及 TSC 电流波形如图 1-5 所示: 1977 年美国 GE 公司首次在实际电力系统中演示运行了使用晶闸管的静止无功补偿装置。1978 年在美国电力科学院支持下, 由西屋电气公司制造的, 以晶闸管为电子开关的静止无功补偿装置正式投入实际运行。静止无功补偿器采用晶闸管作为无触点开关控制电抗器和电容器, 可以实现无冲击、无涌流投切。然而, 由于晶闸管属于半控型器件, 通断有一定的固有延迟, 补偿器的响应速度受到了限制, 另外, 晶闸管控制电抗器会产生低次谐波, 需要额外的滤波器^[5], 晶闸管投切电容器的分组投切, 使其输出的无功功率不能连续调节, 且相位平衡能力有限、控制灵活性较差^[6]。

STATCOM 是基于全控开关的动态无功功率补偿装置, 其主电路结构如图 1-6 所示:

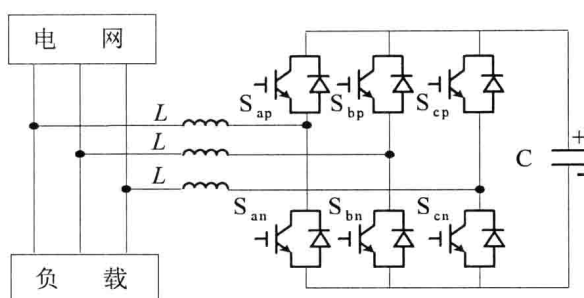


图 1-6 静止无功发生器原理图

1980 年日本研制出第一台 20MV·A STATCOM。到 20 世纪 90 年代取得突破性研究进展，1991 年和 1994 年日本和美国分别研制成功一套 80MV·A 和一套 100MV·A 采用 GTO 的 STATCOM 装置，并成功地投入商业运行。STATCOM 具有能够双向调节无功功率输出、不产生低次谐波、补偿电流波形品质高、响应速度快，不存在谐振问题、基于逆变器结构运行噪音小、维护简单，且由于不采用电容、电抗等无功补偿器件而占地面积小等优点。它的主要缺点为全控开关器件耐压、容量较低且价格高昂，难于制成大容量补偿装置，一次投资及工作损耗较大，控制复杂，可靠性低。所以目前高压无功补偿领域仍然较少采用^[7]。下面将上述补偿设备的主要特性概括如表 1-1 所示：

表 1-1 补偿器特性比较

补偿器类型	SR	TSC	TCR	STATCOM
无功输出	连续	级差	连续	连续
响应时间	$\leq 10\text{ms}$	$\geq 10\text{ms}$	$\leq 10\text{ms}$	$\leq 5\text{ms}$
分相调节	不可以	可以	可以	可以
自身谐波量	小	无	较大	极小
噪声	大	很小	较小	较小
损耗率	0.7%~1%	0.3%~0.5%	0.7%~1%	$\leq 3\%$
控制灵活性	差	好	好	很好
运行维护	简单	较复杂	复杂	复杂
一次投资	较小	适中	适中	较大

由以上分析可见，SVC 是目前应用最多，最为成熟的补偿设备，并且从经济性、装置容量、可靠性等各方面综合考虑，在未来相当长一段时间里，SVC 仍会是世界各国大量采用的动态无功功率补偿技术^[8]。

1.3 TCR+FC 型静止无功补偿器研究现状

1.3.1 TCR 补偿三相不平衡负荷的研究现状

大功率单相负载的接入,单相用户的不可控增容,单相负载用电的不同时性等因素均会造成供电系统三相负荷的不平衡,三相负荷的不平衡会对供电系统及用户造成一系列的危害,所以必须对三相不平衡负荷进行补偿。SVC 可以等效为一个可变速纳的性质,使人们想到可以应用 SVC 改善负荷的不平衡,很多专家和学者这方面进行了深入的研究。

三相负荷不平衡的情况在配电系统中是大量存在的,会对供电系统和用户造成以下危害:

(1) 向系统注入负序电流,导致以负序分量为起动元件的多种保护发生误动作,对电网正常运行产生影响。

(2) 变压器的三相负荷不平衡,使变压器处于不对称运行状态,造成变压器的空载损耗和负载损耗增大。负荷较大的一相绕组过热,且由于磁路不平衡,大量漏磁通过箱壁、夹件使其发热,造成附加损耗。

(3) 三相四线制供电方式,当三相负荷平衡时线损最小,三相负荷不平衡时,电流不对称度越大,线损增量也越大。

(4) 三相负荷不平衡会导致供电线路三相电压不对称,电压偏移值增大。

(5) 对于通信系统,电网三相不对称时,会增大对其干扰,影响正常通信质量。

由以上分析可见,对三相不平衡负荷的平衡化补偿,无论对供电系统还是用户都是有益和必要的。

Steinmetz 首先提出了理想补偿网络理论。在电压对称时,通过一个理想补偿网络与负荷相并联就可以把任何不平衡的、线性的、不接地三相负荷变换成一个平衡的、三相有功负荷,而且不会改变电源和负荷间的有功功率交换。由负荷导纳表示的补偿器电纳不易测量,因此,米勒提出了利用对称分量法计算得出用电压和线电流表示补偿导纳的补偿算法。该方法将三相不平衡负荷与补偿装置的电流分别分解成正序、负序、零序对称分量,再利用理想补偿条件求得用负荷的电流、电压表示的各相所需补偿导纳^[9]。该理论构成了使用无源器件,对三相不平衡负荷平衡化补偿的理论基础。

目前,对三相不平衡负荷的平衡化补偿研究,主要集中于以下几个方面:

电压对称时,通过检测负荷基波电流相关分量,利用对称分量法对其平衡化补偿,保证系统三相线电流动态平衡,且近似为纯有功分量。瞬时无功功率理论可快速计算负

荷电流的有功、无功分量，所以在三相不平衡负荷的平衡化补偿中具有广泛应用。文献[10]提出了静止无功补偿器在电压、电流波形畸变情况下的平衡控制方法与控制信号的检测方法。采用基于瞬时功率理论的检测方法。对于控制所需要的电压和无功电流的有效值、无功功率和功率因数等信号进行检测。文献[11]将瞬时无功功率理论应用于提高功率因数和补偿三相不平衡负荷的静止无功功率补偿器控制之中，简化了瞬时无功功率算法，提出了更为有效的滤波器结构，推导出了补偿电纳的表达公式，动模试验和仿真证明了算法的可行性和有效性。文献[12]提出了基于同步对称分量法的补偿导纳计算方法。该方法采用电网三相正序电压为同步参考坐标，利用旋转对称分量法求得电网需要补偿的导纳值。所提出的三相电压提取方法能够有效消除电网电压的畸变干扰，以电压为同步坐标的旋转对称分量法能够消除电流中谐波的影响，从而准确地计算出电网需要补偿的导纳值。基于该方法设计的静止无功功率补偿装置不需要硬件锁相环，能够快速、准确地补偿对称与不对称负荷的无功功率。

大多数不对称补偿方面的研究是针对三相三线制系统展开的，通常只考虑系统存在负序电流分量的情况，而在三相四线制系统中，系统存在零序电流分量，针对此问题，一些学者对三相四线制系统的不对称补偿进行了研究，文献[13]在对三相四线制供电系统几种特殊情况分析的基础上，采用叠加原理，使用星形和三角形两种接线方式组合，推导出三相不平衡负载平衡化无功补偿公式，能够消除不平衡负荷产生的负序和零序电流分量，保持系统对称，该公式既适合于三相三线制供电系统也适合于三相四线制供电系统。文献[14]进一步提出了基于负荷有功功率和无功功率的三相不平衡负载平衡化补偿的实用模型。文献[15]提出了适用于三相四线制供电系统三相不平衡负载平衡化补偿的基本原则。并提出了基于单片机的补偿策略软、硬件实现方法。将所提算法实用化，取得了良好的实验结果。文献[16]以 SVC 的补偿容量作为优化目标，对三相四线制供电系统不平衡负载平衡化补偿策略进行了优化，使补偿器所需无功容量最小，提高了补偿的经济性。

已有不平衡负载平衡化补偿策略通常将功率因数补偿为1,由于检测与计算环节均存在误差，所以在实际应用中容易发生过补偿，文献[17]通过对 Steinmetz 三相不平衡负荷补偿理论进行改进，提出一种可将功率因数补偿为任意值的补偿电纳计算公式。并推导出了包含功率因数给定值的实用化补偿电纳计算公式，提高了补偿的精度。

已有不平衡负载平衡化补偿策略通常将系统电流不平衡度补偿为 0，会导致所需补偿容量增大，文献[18]提出了将电流不平衡度补偿为 0.2 的补偿电纳计算公式，补偿后，使系统电流不平衡度满足国标要求而不发生过补偿，降低了所需的补偿容量。

电压不对称时，Steinmetz 三相不平衡负荷补偿理论已不再适用，而配电系统电压不对称又是普遍存在的，针对此问题，文献[19]提出了一种电压不对称条件下，TCR 补偿

三相不平衡负荷的方法，该方法可完全消除系统三相负序电流，同时保证 a 相功率因数为 1，但存在补偿网络向系统倒送容性无功功率的问题。

国内外学者对三相不平衡负荷补偿理论做了大量的研究，但对电压不对称条件下的补偿理论研究较少，而在实际电力系统中，电压不对称又是普遍存在的，所以需要对电压不对称条件下的三相不平衡负荷补偿理论进行进一步的探索、研究。

1.3.2 无功电流检测的研究现状

实现在电压不对称条件下，三相不平衡负荷的补偿策略，需要检测相应的负荷电流。基于瞬时无功功率理论的电流检测方法得到广泛应用，基于瞬时无功功率理论的电流检测方法需要锁相环电路，电压不对称会导致锁相结果存在原理性误差，锁相环硬件电路也会由自身精度引起检测误差，并存在安装、调试困难的缺点。针对此问题，国内外学者对无锁相环电流检测方法进行了相关研究。

电压不对称条件下，无锁相环电流检测电路主要有 2 种实现方法，一种方法是对不对称电压进行快速序分解，将求得的正序电压分量进行 $\alpha\beta$ 变换，得到 u_α 、 u_β ，利用 u_α 、 u_β 的矢量角作为同步旋转角，构造锁相环信号，快速检测相关电流分量。另一种方法是在瞬时无功功率理论检测电流的方法中，用预设固定频率的转换矩阵，代替常规谐波电流检测方法中的锁相环电路。

文献[20-22]提出了通过对三相电压进行 $\alpha\beta$ 变换得到 u_α 、 u_β ，利用 u_α 、 u_β 的矢量角作为同步旋转角构造锁相信号的方法，但当电源电压不对称时， u_α 、 u_β 的矢量角不能够匀速旋转，负序电流检测精度会受到影响。此时，为获得准确结果，需要对不对称电压进行序分解，国内外学者对不对称分量的快速序分解方法做了大量的研究。传统序分解方法需要进行相量计算，只能用于稳态分析，不适用于对电流的快速检测，所以研究在时域内定义的序分解方法，对电压不对称条件下，相关电流的检测具有重要意义。文献[23]通过直接在时域内对电流移相 60° ，利用三角函数变换的方法进行计算得到各序分量，该方法原理清晰，易于硬件实现，但存在 $1/6$ 周期的延时，实时性较差。针对传统对称分量法的不足，文献[24-26]提出了基于瞬时对称分量的方法，采用瞬时值对三相不对称相量进行序分解，将其应用到不对称三相电量的动态分析中。但也采用了移相算子进行对称分量变换，引入了延迟使实时性变差。针对瞬时分量法的不足，文献[27]提出了一种基于时域测量的改进瞬时对称分量法。该方法利用三相电压或电流的瞬时值，构造一个无延迟的旋转相量，以复数的形式直接计算三相电量的正序、负序和零序值。该算法无需三角函数计算，计算速度较快，实时性好，便于在工程上实现。并提出了一种新型的基于瞬时对称分量理论的正、负序电流检测方法。

一些学者从纯粹数学变换的角度提出了基于电压序分解的电流检测新方法。文献[28-30]通过对幅值积分信号的选频特性进行分析,研究了一种负序基波提取器,并在此基础上提出了一种新型负序基波电流检测方法。基于负序基波提取器的检测方法既不需要低通滤波器、锁相环,也不需要进行 $\alpha\beta$ 坐标变换到 dq 坐标及其反变换的计算。仿真及实验表明该方法可快速提取出基波负序分量。文献[31]通过使用单相电网电压的微分信号构造同步旋转角,克服了传统同步检测法中PLL带来的负面影响,降低了同步旋转角的计算复杂度。仿真结果表明,所提出的方法在检测电流正序、负序分量时,具有精度高、速度快的优点。文献[32]采用查表的方法代替锁相环获取同步变换角,但必须对电源电压逐个周期进行计数求得实时的角频率,实质上,变相采用了数字锁相环。

在瞬时无功功率理论负序分量检测方法的坐标变换过程中,C变换矩阵的频率偏差对检测结果不构成影响。所以可将变换矩阵中的频率换为一个固定值,省去传统检测方法中锁相环,简化检测电路。文献[33-36]分析了在瞬时无功功率理论负序分量检测方法的坐标变换过程中,频率偏差对检测结果不产生影响的原因。提出了变换矩阵预设频率的实现方法,仿真与实验验证了方法的可行性与有效性。

由于电压不对称会造成锁相信号产生误差,影响检测结果,所以基于无锁相环的电流检测方法对于电压不对称条件下,实现对不平衡补偿策略所需参数的快速、准确检测尤为重要,需要进一步深入研究。

1.3.3 无源滤波器优化设计研究现状

随着电力电子技术的迅速发展,谐波问题日趋严重,引起世界各国的高度重视。无源滤波器作为传统的谐波滤波手段,因其结构简单,成本低廉,得到了广泛的应用^[37]。

传统的滤波器设计方法仅针对单一设计指标,依据工程经验或简化模型进行设计,但无法满足滤波器参数设计的多种实际因素,如投资指标、滤波性能等。文献[38]提出电容器安装容量最小法,以电容容量最小化为目标进行滤波器设计,未考虑其他因素对滤波器的影响。文献[39]提出了无功功率补偿容量法,仅考虑系统中所需的无功补偿总容量,对于系统能否能有效滤除电网中的谐波、投资金额的大小、在系统发生频偏时滤波性能等多方面的因素均未涉及。可见,此种方法不能实现全面优化。

无源滤波器结构简单,但其设计却需要同时考虑技术、经济、安全多方面因素,是典型的多目标、非线性优化问题,若处理不当,容易造成滤波效果不佳、初期投资增加、系统无功功率过补偿等不良后果,甚至导致无源滤波器与电网阻抗发生串、并联谐振而造成损坏。因此近年来,针对无源滤波器的研究逐渐转向利用遗传算法等手段进行多目标综合优化设计^[40-43]。

针对目前无源滤波器的设计方法过分依赖经验及优化能力不强的问题,文献[44, 45]利用改进遗传算法的全局寻优能力,提出了一种基于遗传算法的无源滤波器设计方法,对无源滤波器的成本、无功补偿和滤波效果3个目标进行全局优化。通过对适应度函数的阈值制约,以及以不同概率进行染色体选择操作,使种群朝3个目标最佳协调点的方向进化。并采用混沌算子来解决早熟收敛问题。这也是目前无源滤波器主要的优化设计方法。文献[46]分析了已有优化设计方法的缺点,提出了基于改进粒子群优化算法的无源滤波器多目标优化设计方法。通过将无源滤波器的无功功率补偿容量、初期投资及补偿后的滤波效果作为优化目标,利用粒子群优化算法对其参数进行了优化设计,减少了人工计算量,提高了算法的寻优速度。针对现有优化设计方法中假设条件较多、寻优能力不强等问题,文献[47]提出了一种采用混沌算法,将无源滤波器的初期投资、无功功率补偿、滤波后电网谐波含量作为优化目标,进行无源滤波器的参数优化设计。实践证明该方法设计的无源滤波器具有较好的综合性能。文献[48]采用蚁群算法,以最低成本为目标,优化设计了C型阻尼滤波器。仿真结果证明蚁群算法应用于电力系统优化设计是可行的,优化效果优于传统遗传算法。文献[49]采用混沌模拟退火策略来进行无源滤波器的多目标参数优化设计。提出了Logistic混沌映射与模拟退火策略相结合的参数优化设计方法,并将不同优化方法的性能进行了对比,仿真结果验证了该方法设计出的无源滤波器具有良好的综合性能。以上分析可见,国内外学者在采用各种智能优化手段对滤波器进行多目标综合优化设计方面,取得了较多研究成果。

还有一些学者不是通过对滤波器参数设计方法的研究,直接改善滤波装置的工作性能,而是给出了解决滤波器优化设计的新思路,文献[50-52]中提出一种依据在配电网中线性与非线性负载间无源滤波器的位置、容量进行优化的方法,通过配置滤波器安装地点、容量大小,使滤波器工作性能最优。文献[53]提出了滤波效益的概念,滤波效益不仅取决于滤波器本身参数,同时还考虑到系统谐波阻抗的大小、滤波器的安装位置等因素。量化描述了滤波器与系统对谐波的分流情况。

实际系统中,电网电抗及电网频率是不断变化的,研究在电网参数不断变化条件下,滤波器参数的优化设计具有重要的理论及应用价值。灵敏度分析是研究系统阻抗、滤波器、负载阻抗的参数及谐波源变化对滤波特性影响的有效工具,也是最终确定滤波器参数的主要依据之一。文献[54]给出了无源滤波器参数设计的建模方法。依据Thevenin定理与Norton定理对无源滤波器在基波与谐波下的工作状态进行数学建模分析。基于数值方法,分析了电网电抗及电网频率摄动时,流入滤波器基波电流的变化过程。采用符号计算求得了注入电网及各滤波器谐波电流的表达式。数值分析与现场实验结果证明,应用该文所提方法设计的滤波装置后,进入电网的谐波符合国家标准。文献[55]介绍了采用伴随网络求解频率灵敏度的方法,利用此方法确定了电网频率摄动对滤波特性的影响